



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY



ARTS ET MÉTIERS PARISTECH
CENTRE DE CLUNY

URČENÍ ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO VÝROBU VYBRANÝCH LETECKÝCH SOUČÁSTÍ

ESTABLISHMENT OF CUTTING CONDITIONS FOR SELECTED AIRCRAFT
PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Yoann BARON

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

Ing. David PRAT, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Yoann Baron

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Industrial Engineering (2301T043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Určení řezných podmínek pro výrobu vybraných leteckých součástí

v anglickém jazyce:

Establishment of cutting conditions for selected aircraft parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cíle diplomové práce:

Úvod

1. Teoretický rozbor problému
2. Navržené varianty řešení optimalizace vybraných technologií
3. Experimentální zkoušky, verifikace optimalizačních návrhů
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

Stahl, J.E. Metal cutting. Theories and models. Lund, 2012, Sweden, 1st ed., pp. 580.

SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

Srikanth, T. a Kamala V. Optimization of Cutting Parameters in Turning. International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Volume 3, Number 5 (2008), pp. 725–73

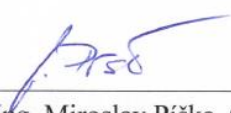
Ferry, W ., Altintas, Y., 2008, “Virtual Five Axis Milling of Impellers, Part – I: Feedrate Optimization of Five Axis Milling”, Trans. ASME, J. Manufac. Sc. and Eng. Vol. 130, pp. 0110013-1:13.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21. 11. 2014





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Úvod

Tato studie byla vytvořena ve spolupráci se společností Safran, experimentální část byla zrealizována ve výrobním závodě Evry-Corbeil ve Francii.

Tato práce se týká optimalizace řezných podmínek pro vnitřní hrubovací soustružení součástí pro letecký průmysl za vysokého tlaku chladicí kapaliny. Jako materiál pro tuto operaci byla použita superslitina na bázi niklu s podobnými vlastnostmi jako Inkonel 718, která byla obráběná kruhovou keramickou břitovou destičkou RCGX090700 o průměru 9,52 mm.

Tato experimentální práce bude sloužit jako předběžná studie pro konečné obrábění dané letecké součásti.

Cíle práce byly následující: srovnání rozdílných vyměnitelných břitových destiček dodaných společností Safran, návrh hrubovacích strategií a určení optimálních podmínek pro každou z vybraných strategií.

Každá strategie je hodnocená na základě dvou kritérií. První je vývoj opotřebení nástroje v závislosti na čase obrábění, což při stanovení dané limitní hodnoty opotřebení umožní odhadnout trvanlivost břitu. Odhadovaná životnost břitu společně s řeznými parametry umožní určit množství materiálu odebraného jedním břitem. Druhé kritérium je objem odebraného materiálu za jednotku času vedoucí ke zhodnocení produktivity.

Tato práce je rozdělena do třech hlavních částí: teoretický rozbor problematiky, návrh optimalizačních řešení a experimentální verifikace.

Toto je rozšířený abstrakt diplomové práce skládající se v plném rozsahu z 90 stránek (78 000 znaků a 14 000 slov), 80 obrázků a grafů, 12 tabulek, 7 rovnic a je založena na 48 literárních zdrojích.

Teoretický rozbor problematiky

Teoretická analýza problémů je založena na třech tématech vztahujících se k předmětu studie: superslitiny na bázi niklu, obrábění za přívodu vysokého tlaku chladicí kapaliny do místa řezu a analýza opotřebení nástroje.

Niklové superslitiny

Stahl [1] vysvětluje, že „superslitina“ je souhrnný název pro slitiny na bázi niklu, kobaltu nebo železa s velmi vysokými mechanickými a termálními vlastnostmi. Podle Donachieho a kol. [2] se začaly tyto slitiny používat ve 20. letech 20. století jako náhrada korozivzdorných ocelí, které již nesplňovaly vysoké materiálové požadavky průmyslových aplikací. Geddes a kol. [3] konstatovali, že dnes jsou superslitiny hojně využívány pro pokročilá zařízení zvláště v letectví, nukleární sféře nebo biomedicině. Podle Reeda [4] jsou jedny z nejvíce se vyskytujících aplikací niklových superslitin součástí leteckého motoru, zejména ty, které vyžadují vysokou mechanickou a termální odolnost.

Niklové superslitiny mají v závislosti na chemickém složení rozdílné vlastnosti. Ezugwu [5] udává následující příklady: ve spojení s chromem a železem mají slitiny vyšší pevnost, zatímco hliník a titan dodávají lepší odolnost za vysokých teplot.

Mezi hlavními niklovými superslitinami používanými v průmyslu cituje Stahl [1] skupinu Inkonelů (625, 718 aj.), Waspaloy and Hastelloy.

Inkonel 718 je jedna z nejčastěji využívaných slitin pro letecké aplikace. Její hlavní chemické prvky jsou chrom, železo a kobalt. V tab. 1 jsou uvedeny typické vlastnosti Inkonelu 718, podle Alloy Wire International Ltd. [6].

Tab. 1 Vlastnosti Inkonelu 718 [6].

| | |
|--|---|
| Hustota | 8.19 g.cm ⁻³ |
| Bod tání | 1336 °C |
| Koeficient teplotní roztažnosti | 13.0 10 ⁻⁶ .K ⁻¹ (20 - 100°C) |
| Modul pevnosti | 77.2 kN.mm ⁻² |
| Modul pružnosti | 204.9 kN.mm ⁻² |

Tyto charakteristiky umožňují Inkonelu 718 dosáhnout velmi vysokých hodnot v oblasti mechanických a termálních vlastností, což vysvětluje jeho rozšířené využití zejména v leteckých motorech, např. pro součásti na straně kompresoru, turbíny i u spalovací komory, jak uvádí Special Metals Corporation [7].

Ezugwu [5] vysvětluje, že niklové superslitiny mají obecně vzato velmi nízkou obrobiteľnost danou mnoha faktory spojenými s chemickým složením a materiálovými vlastnostmi. Jeden z nejdůležitějších faktorů je ten, že slitiny niklu jsou žáruvzdorné a mají nízkou tepelnou vodivost (přibližně 11 W·m⁻¹·K⁻¹). K tomu ještě Fontaine [8] dodává, že tyto materiály mají velmi vysokou hodnotu specifické řezné síly (mezi 5000 a 7000 MPa). Podle Choudhuryho a kol. [9], tři nástrojové materiály jsou používány na obrábění niklových superslitin: keramika, cementovaný karbid wolframu a kubický nitrid boru.

Obrábění za vysokého tlaku chladicí kapaliny

Podle Courbona a kol. [10], princip vysokotlakého obrábění spočívá v zavedení kapaliny za vysokého tlaku (od 70 bar) mezi třísku a čelo nástroje. Proud pak třísku nadzvedne a následně ji přeruší. Další významný přínos této metody je zkrácení délky kontaktu mezi nástrojem a třískou, což má za následek snížení řezných sil a teplot. Tím pádem lze významně zvýšit životnost nástroje a následně i řezné parametry.

Jak uvádí Seco [12], existuje několik kategorií tlaku s rozdílnými dopady na obráběcí operace. V této práci použité tlaky spadají do kategorie ultra vysokých tlaků, což odpovídá hodnotám mezi 70 a 350 bar. Nicméně mnoho z publikovaných studií o vysokotlakém obrábění používá vyšší tlaky, až tisíce barů, jako např. ve studii Courbona a kol. [11] (1300 bar) a Ojmertze a kol. [13] (3600 bar). Jejich vliv na obráběcí operaci je velmi podobný, avšak hodnoty se pohybují v jiných řádech.

Opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje může být sledováno ze dvou úhlů pohledu: mechanismy způsobující opotřebení a fyzický dopad na nástroj.

Pro případ obrábění superslitin na bázi niklu rozlišuje Grzesik [14] čtyři nejčastější druhy mechanismů opotřebení: adheze, abraze, difuze a oxidace. Tyto jevy mohou být mechanické nebo chemické a mají nepříznivé účinky na integritu nástroje, způsobují tvorbu opotřebení nástroje a v některých případech i celkové zničení bříty.

Fyzické důsledky těchto jevů na nástroji mohou být postupné opotřebení, jako např. opotřebení na hřbetě, vydrolení nebo vrubové opotřebení ostří, opotřebení ne tvaru žlábků na čele, nebo náhlé, jako např. lom břitu nástroje, termální trhliny nebo ulomení špičky, v krajním případě může být břit zničen úplně.

Opotřebení nástroje může být omezeno použitím chladicí kapaliny za vysokého tlaku, jako bylo dokázáno Courbonem a kol. [10]. V místě kontaktu nástroje s třískou jsou řezné síly a teploty sníženy, a tím pádem jsou dopady zmíněných mechanismů opotřebení také sníženy, ne-li eliminovány. Ezugwu [5] také dokázal, že životnost nástroje je při použití chladicí kapaliny za vysokého tlaku také významně zvýšena, což platí i pro ultra vysoké tlaky.

Návrh optimalizačního řešení

Tato kapitola je rozdělena do dvou částí: úvod do existujících metod optimalizace řezných podmínek a definice vybrané metody pro experimenty.

Úvod do optimalizačních metod

V průmyslu se používá mnoho optimalizačních metod, a to empirické (např. Taylorova metoda nebo metoda COM) nebo numerické.

Stahl ve své práci [1] vysvětluje, že Taylorova metoda je jedna z nejstarších optimalizačních metod založených na pozorování opotřebení hřbetu. Taylor dokázal, že trvanlivost nástroje v závislosti na řezné rychlosti pro danou hodnotu kritéria opotřebení hřbetu může být v logaritmickém měřítku lineárně aproximována. Z toho lze vyvodit přímý vztah pro trvanlivost nástroje a řeznou rychlost. Praktické zkoušky pak následně umožňují určit zbývající konstanty pro konečnou podobu rovnice. Podle Shawa [15] existuje velké množství verzí tohoto vztahu, se zapojením dalších parametrů, jako jsou např. posuv nebo šířka záběru ostří.

Metoda COM definovaná Francouzskou normou NF E 66-520 [16] je celková metoda s cílem definovat pracovní zónu nástroje v materiálu pro danou operaci, a to pomocí měření příkonu nebo síly (v závislosti na měřicím vybavení). Plán testu se skládá z následujících pěti kroků.

- Kvalifikační test: pomocí experimentů definovat přijatelné a stabilní operační body (kombinace řezné rychlosti (v_c), posuvu (f) a šířky záběru ostří (a_p)).
- Určení $v_{c,min}$: testovat různé řezné rychlosti s a_p a f určenými v kvalifikačních testech, vykreslení hodnot specifické řezné síly (K_s) pro každý test. $v_{c,min}$ určeno jako nejnižší hodnota řezné rychlosti před zvýšením K_s .
- Určení zóny kontrolované třísky: počínaje operačním bodem vybrat několik tříd posuvu a šířky záběru ostří. Pro každou kombinaci f a a_p posbírat třísky. Zóna regulace třísek odpovídá podmínkám, pro které je morfologie třísek přijatelná.
- Testy opotřebení: pro každou dvojici f a a_p v zóně kontrolované třísky realizovat testy opotřebení nástroje, aby mohla být aplikována Taylorova metoda. Tato metoda umožňuje vizualizaci vlivu každého jednotlivého řezného parametru a odhadnutí životnosti nástroje v závislosti na řezných podmínkách.
- Testy pro určení dalších parametrů: určit specifickou řeznou sílu pro odhadnutí příkonu, krouticího momentu a tangenciálních sil v průběhu řezné operace.

Definice vybrané optimalizační metody pro experimenty

Vybraná optimalizační metoda je částečně založená na metodě COM. Pro experiment byly uvažovány dvě rozdílné strategie: soustružení s konstantním posuvem a šířkou záběru ostří a tzv. „ramping“, jehož princip spočívá v proměnlivých hodnotách posuvu a šířky záběru ostří během obrábění. V průběhu každého řezu operace ramping se šířka záběru ostří mění od 0 mm do stanovené hodnoty $a_{p,max}$, a posuv klesá v rozmezí dvou stanovených hodnot f_{max} and f_{min} . Tato strategie umožňuje rovnoměrné rozložení opotřebení podél břitů. Pro každou z těchto dvou strategií je provedena operace čelního a podélného soustružení.

Tato studie má za cíle určit optimální kombinaci všech čtyř řezných parametrů (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří a tlak chladicí kapaliny) pro všechny výše definované operace soustružení. Pro všechny testy je měřeno opotřebení hřbetu na nástroji. Jako optimální podmínky budou určeny ty, které povedou k co nejmenšímu opotřebení.

- Krok 1: Určení operačního bodu.

Operační bod je určen na základě rychlých experimentů. Jedná se o kombinaci parametrů, které mají za výsledek přijatelné opotřebení. Tyto hodnoty nemusí být určeny s vysokou přesností.

- Krok 2: Určení tlaku chladicí kapaliny.

S řeznými podmínkami určenými v předchozím kroku jsou realizovány testy pro rozdílné tlaky chladicí kapaliny s cílem naleznutí optimální hodnoty.

- Krok 3: Výběr tříd posuvu a šířky záběru ostří.

Třídy posuvu a šířky záběru ostří jsou vybrány na základě přechodných experimentů, jako kompromis mezi optimálním opotřebením nástroje a dostatečným objemem odebraného materiálu za jednotku času. Aby se omezil celkový počet testů, je vybráno pouze několik tříd (dvě až tři od každého parametru)

- Krok 4: Hledání optimální řezné rychlosti.

Pro každou kombinaci vybraných posuvů a šířek záběru ostří jsou testovány rozdílné řezné rychlosti s cílem naleznutí optimální hodnoty.

- Krok 5: Životnost nástroje.

Pro každé operační podmínky určené v předchozích krocích jsou provedeny testy pro různé časy obrábění. Pro každý nový test je použit nový nástroj. Výsledná křivka umožňuje pozorovat vývoj opotřebení a z něj vyvodit životnost nástroje v závislosti na daném kritériu opotřebení. Na základě srovnání křivek pro různé strategie lze určit optimální řezné podmínky.

Experimentální verifikace

Všechny testy byly realizovány na dvouosém numerickém soustruhu s dvěma způsoby řešení přívodu chladicí kapaliny: nízkotlakým (do 14 bar) přivedeným přímo ze stroje a ultra vysokotlakým (70-350 bar) přivedeným z externího vysokotlakého zásobovacího systému. Nástroje byly měřeny na stereomikroskopu.

Opotřebení nástroje bylo hodnoceno na základě hloubky pravidelného opotřebení hřbetu nazývaného VB a maximální opotřebení nazývaného VBmax, což může být vrubové opotřebení, vyštípnutí nástroje, opotřebení ve formě kráteru, adheze třísky nebo jen velmi vysoká hodnota pravidelného opotřebení hřbetu, pokud nejsou jiné formy opotřebení přítomny. Vědomě žádná limitní hodnota opotřebení nebyla pro tuto studii určena a testy byly realizovány až do zničení nástroje. Tak bylo možno pozorovat vývoj geometrie nástroje v závislosti na čase obrábění. Pro finální aplikaci za vybraných řezných podmínek bude životnost nástroje určena pomocí definice konkrétní limitní hodnoty opotřebení nástroje.

Každý test byl realizován nejméně dvakrát, pro nejlepší řezné podmínky byly testy zopakovány pak ještě jednou nebo dvakrát. Byl pozorován rozptyl výsledků, aby bylo možno určit, zda je daný proces spolehlivý. Pro průmyslové aplikace je nutné, aby byl proces dobře opakovatelný, takže při vysokém rozptylu výsledných hodnot nejsou dané podmínky doporučovány, protože jsou nestabilní.

Experimentální testy byly realizovány ve čtyřech fázích: výběr břitové destičky, testy s konstantním posuvem a šířkou záběru ostří, testy se strategií ramping a srovnání obou strategií. Pro každou konfiguraci byla použita výše definovaná metoda.

Fáze 1: Výběr břitové destičky

První fáze spočívala ve výběru břitové destičky z devíti destiček určených společností Snecma. Tyto destičky mají rozdílné chemické složení (oxid hliníku vyztužený vlákny whisker nebo sialon) a rozdílné přípravy břitu (honování nebo zkosení).

Pro tuto fázi byly testy realizovány ve čtyřech čelních řezech pro dosažení celkového objemu odebraného materiálu 90 cm^3 . Byly vybrány následující řezné podmínky: v_c [200; 250; 280; 300; 350] m/min, $f = 0,15 \text{ mm}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$, $P = 200 \text{ bar}$.

Nástroj byl vybrán na základě minimálního opotřebení hřbetu společně s ekonomickým zvážením.

Fáze 2: Testy s konstantním posuvem a šířkou záběru ostří

Tyto testy byly realizovány pro čelní a podélné soustružení.

Čelní soustružení

Všechny testy pro čelní soustružení byly realizovány ve čtyřech řezech.

- Krok 1: Určení operačního bodu.

Experimentálně byly určeny následující podmínky: $v_c = 300 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$.

- Krok 2: Určení tlaku chladicí kapaliny

Pro tento krok byly zvoleny podmínky definované v přechodném kroku v kombinaci s následujícími hodnotami tlaku: P [70; 100; 150; 200; 250] bar. Nejnižší opotřebení hřbetu bylo pozorováno pro 200 bar. Tento výsledek je potvrzen i při sledování tvorby třísek, jak lze vidět na obr. 1.



Obr. 1 Tvorba třísek pro rozdílné tlaky chladicí kapaliny.
 $v_c = 300$ m/min; $f = 0,15$ mm; $a_p = 1,5$ mm.

- Krok 3: Výběr tříd posuvu a šířky záběru ostří

Byly vybrány tyto třídy posuvu a šířky záběru ostří: f [0,15; 0,18; 0,20] mm, a_p [1,5; 2] mm. Výsledný objem odebraného materiálu byl roven 90 cm^3 pro $a_p = 1,5$ mm a 120 cm^3 pro $a_p = 2$ mm.

- Krok 4: Hledání optimální řezné rychlosti

Pro každou kombinaci posuvu a šířky záběru ostří bylo testováno několik řezných rychlostí. Jako nejlepší byly vybrány následující podmínky: $v_c = 300$ m/min, $f = 0,15$ mm, $a_p = 1,5$ mm, $P = 200$ bar.

- Krok 5: Životnost nástroje

Pro vybrané podmínky bylo provedeno několik testů s postupným zvyšováním počtu řezů, aby bylo možné pozorovat vývoj opotřebení hřbetu v závislosti na čase obrábění. Testy byly prováděny od čtyř řezů až do zničení ostří.

Maximální dosažený čas obrábění pro čelní soustružení byl 99 sekund.

Podélné soustružení

Pro podélné soustružení byly testy realizovány přímo pro optimální řezné podmínky určené pro čelní soustružení. Všechny testy byly zhotoveny v rámci jednoho řezu.

Maximální dosažený čas obrábění pro podélné soustružení bylo 114 sekund.

Srovnání čelního a podélného soustružení

Nástroje při čelním soustružení mají více tendenci k opotřebení soustředěném na malé ploše, což je navíc podpořeno vícenásobnými vstupy do materiálu. Teplota během operace je velmi proměnná, což zamezuje přehřátí nástroje. Nicméně teplotní změny mohou mít negativní dopad na břitovou destičku, jak tomu je zvláště v případě keramických nástrojů, které jsou křehké a náchylné na teplotní změny.

Při srovnání výše uvedených výsledků je optimálnější strategií pro soustružení s konstantním posuvem a šířkou záběru ostří podélné soustružení s následujícími podmínkami: $v_c = 300 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$, $P = 200 \text{ bar}$.

Fáze 3: Testy se strategií ramping

Všechny testy se strategií ramping byly provedeny v rámci osmi řezů s následujícím rozsahem šířky záběru ostří: $0 < a_p [\text{mm}] < 1,5$, s celkovým objemem odebraného materiálu 75 cm^3 . Vliv tohoto parametry tedy nebyl v této fázi pozorován. Vybrané rozsahy posuvu pro tyto experiment byly $0,05 < f [\text{mm}] < 0,15$, $0,08 < f [\text{mm}] < 0,18$ a $0,10 < f [\text{mm}] < 0,20$.

Čelní soustružení se strategií ramping

Pro každý rozsah posuvu byl určen optimální tlak, a to pro řeznou rychlost 350 m/min . Pro jednotlivé rozsahy posuvu byly nalezeny následující tlaky:

$$0,05 < f [\text{mm}] < 0,15: P = 200 \text{ bar.}$$

$$0,08 < f [\text{mm}] < 0,18: P = 250 \text{ bar.}$$

$$0,10 < f [\text{mm}] < 0,20: P = 250 \text{ bar.}$$

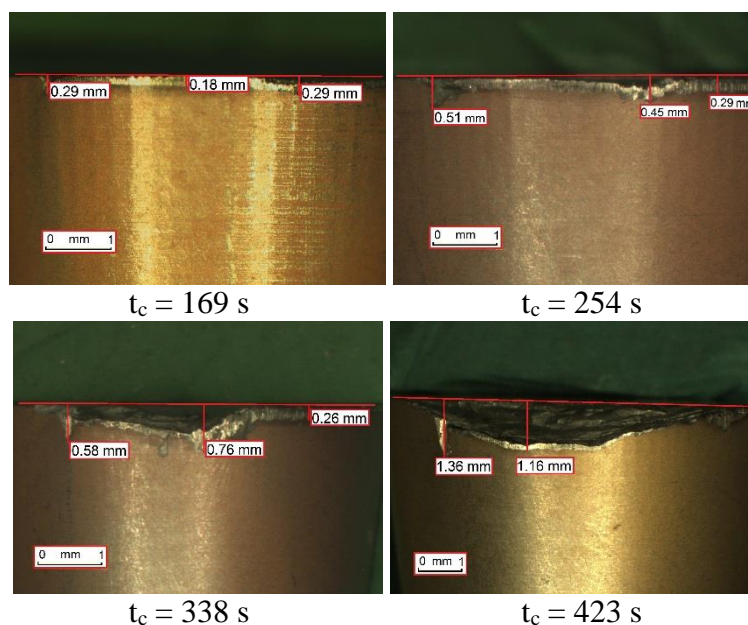
Pro každé z těchto podmínek byly realizovány testy pro nalezení optimální řezných podmínek, s následujícími výsledky:

$$0,05 < f [\text{mm}] < 0,15: v_c = 350 \text{ m/min}$$

$$0,08 < f [\text{mm}] < 0,18: v_c = 320 \text{ m/min}$$

$$0,10 < f [\text{mm}] < 0,20: v_c = 300 \text{ m/min.}$$

Za všech řezných podmínek bylo dosaženo podobného opotřebení hřbetu, tak byly následně realizovány testy životnosti. Konečné zvolené podmínky byly následující: $v_c = 350 \text{ m/min}$, $0 < a_p [\text{mm}] < 1,5$, $0,05 < f [\text{mm}] < 0,15$, $P = 200 \text{ bar}$. Na obr. 2 jsou ukázány použité břitové destičky pro rozdílné časy obrábění.



Obr. 2 Břitové destičky po čelním soustružení strategií ramping pro různé časy obrábění.
 $v_c = 350$ m/min; $0,05 < f$ [mm] $< 0,15$; $0 < a_p$ [mm] $< 1,5$; $P = 200$ bar.

Za těchto podmínek byl maximální pozorovaný čas obrábění 423 sekund.

Podélné soustružení se strategií ramping

Stejně jako pro fázi 1 byly testy životnosti přímo realizovány se stejnými řeznými podmínkami jako pro čelní soustružení, se stejnými třemi rozsahy posuvu.

Konečné vybrané podmínky byly následující: $v_c = 350$ m/min, $0,05 < f$ [mm] $< 0,15$, $0 < a_p$ [mm] $< 1,5$, $P = 200$ bar.

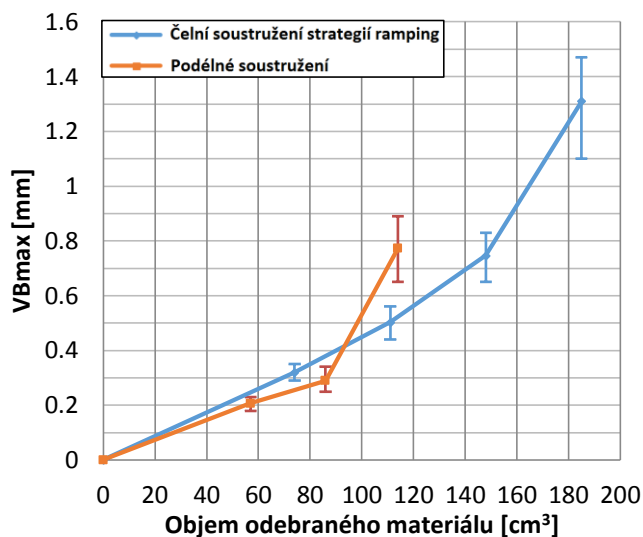
Za těchto podmínek byl maximální pozorovaný čas obrábění 327 sekund.

Srovnání čelního a podélného soustružení se strategií ramping

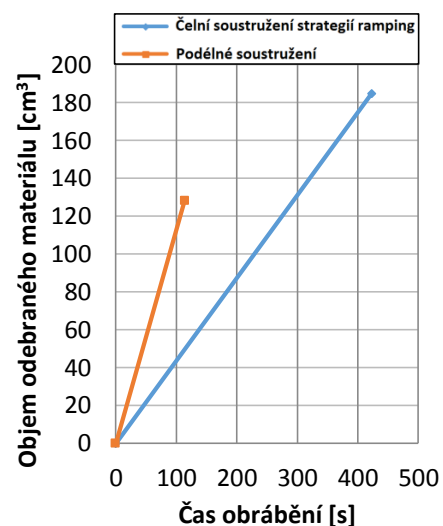
Optimální konfigurací pro strategii ramping je čelní obrábění s následujícími podmínkami: $v_c = 350$ m/min, $0,05 < f$ [mm] $< 0,15$, $0 < a_p$ [mm] $< 1,5$, $P = 200$ bar.

Fáze 4: Srovnání obou strategií

V této fázi bylo uvažováno maximální opotřebení hřbetu pro obě zvolené strategie v závislosti na objemu odebraného materiálu (viz obr. 3) stejně jako množství odebraného materiálu v závislosti na čase obrábění (viz obr. 4)



Obr. 3 Vývoj opotřebení hřbetu v závislosti na objemu odebraného materiálu pro rozdílné strategie.



Obr. 4 Vývoj množství odebraného materiálu v závislosti na čase obrábění pro rozdílné strategie.

Čelní soustružení se strategií ramping: $v_c = 300$ m/min; $0,05 < f$ [mm] $< 0,15$; $0 < a_p$ [mm] $< 1,5$; $P = 200$ bar.
 Podélné soustružení: $v_c = 300$ m/min; $f = 0,15$ mm; $a_p = 1,5$ mm; $P = 200$ bar.

Čelní soustružení se strategií ramping umožňuje pomocí jednoho břitu odebrat větší množství materiálu (185 cm^3) než podélné soustružení (128 cm^3). Nicméně podélné soustružení je více produktivní než čelní soustružení se strategií ramping s objemem odebraného materiálu za jednotku času $67.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ oproti $26.25 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Závěry

Tato práce představuje přehled superslitin na bázi niklu, jejich vlastností a typických aplikací. Je také zaměřena na aplikaci obrábění těchto materiálu za vysokého tlaku chladicí kapaliny. Bylo také studováno opotřebení nástroje a rozličné optimalizační metody pro soustružení.

Experimentální část je založena na soustružení superslitiny na bázi niklu pomocí kruhové keramické břitové destičky. Zvolená optimalizační metoda byla částečně založena na metodě COM. Postupně byl pozorován vliv řezných podmínek (řezné rychlosti, posuvu, šířky záběru ostří a tlaku chladicí kapaliny) na opotřebení hřbetu nástroje. Vybraná optimalizační metoda byla aplikovaná na strategii konstantního posuvu a šířky záběru ostří a na strategii ramping. Každá strategie byla testována pro čelní a podélné soustružení. Následně byly definovány optimální podmínky pro každou strategii.

Pro strategii konstantního posuvu a šířky záběru ostří byly jako optimální podmínky vybrány řezné podmínky pro podélné soustružení. Pro strategii ramping byly optimální podmínky vybrány pro čelní soustružení. Tyto dvě strategie byly srovnány na základě ekonomického a produktivního kritéria.

Pro tuto aplikaci je ekonomicky výhodnější čelní soustružení se strategií ramping, protože každý břit může odebrat o 30% více materiálu, zatímco podélné soustružení je produktivnější, protože umožňuje za stejný čas odebrat o 60% více materiálu. Konečné rozhodnutí závisí na ekonomických podnětech odvíjejících se z technických podkladů a dalších dodatečných nákladů

Tato optimalizační metoda je aplikovatelná v průmyslu. Nicméně tato předběžná studie by měla být následně ověřena v reálných podmínkách soustružení finální letecké součásti.

Literární zdroje k abstraktu

- [1] STAHL, J.E. Metal cutting. Theories and models. Lund, 2012, Sweden, 1st ed., pp. 580.
- [2] DONACHIE, M. J., DONACHIE S. J. *Superalloys: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2002, x, 439 s. ISBN 08-717-0749-7.
- [3] GEDDES, LEON H., HUANG X. *Superalloys: Alloying and Performance*. ASM International. 2010. Sample available on:
http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05300G_Sample_BuyNow.pdf/0245b336-1973-4ec4-be26-987b796550bd
- [4] REED, R. C. *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, xv, 372 s. ISBN 978-0-521-85904-2.
- [5] EZUGWU, E.O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, 45(12-13): 1353-1367. ISSN 0890-6955.
- [6] ALLOY WIRE. Inconel 718 Specification [online]. [15.3.2015]. Available on:
http://www.alloywire.com/inconel_alloy_718.html

| | | |
|---------|-----------------|---------|
| FSI VUT | DIPLOMOVÁ PRÁCE | List 14 |
|---------|-----------------|---------|

- [7] PCC FORGED PRODUCTS. High-Performance Alloys For aircraft, land-based & marine gas turbines [online]. [15.3.2015]. Available on: http://www.pccforgedproducts.com/web/user_content/files/wyman/gas%20turbines.pdf
- [8] FONTAINE, M. *Modélisation thermomécanique du fraisage de forme et validation expérimentale*. Metz, 2004. Thesis. Université de Metz, France. Available on: <http://docnum.univ-lorraine.fr/public/UPV-M/Theses/2004/Fontaine.Michael.SMZ0428.pdf>
- [9] CHOUDHURY, I.A, EL-BARADIE M.A, DEVOR R.E. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998, 77(1-3): 278-284.
- [10] COURBON, C., SAJN V., KRAMAR D., RECH J., KOSEL F., KOPAC J. Investigation of machining performance in high pressure jet assisted turning of Inconel 718: A numerical model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, 211(11): 1834-1851.
- [11] COURBON, C., KRAMAR, D. KRAJNIK P., PUSAVEC F., RECH J., KOPAC J. Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, 49(14): 1114-1125.
- [12] SECO [online]. [15.3.2015]. Available on: <https://www.secotools.com/CorpWeb/india/pdf/Jet%20Stream%20Tooling.PDF>
- [13] ÖJMERTZ, K. M.C., OSKARSON H.-B., BRAHMANKAR P.K., RAHMAN M., LARROUQUERE D. Wear on SiC-Whiskers Reinforced Ceramic Inserts When Cutting Inconel With Waterjet Assistance. *Tribology Transactions*. 1999, 42(3): 471-478.
- [14] GRZESIK, W., van LUTTERVELT C.A. An investigation of the thermal effects in orthogonal cutting associated with multilayer coatings. *Annals of the CIRP*. 2001, 50, 53–56.
- [15] ZHENG G., ZHAO J., GAO Z., CAO Q. Cutting performance and wear mechanisms of Sialon–Si3N4 graded nano-composite ceramic cutting tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, 58, 19–28.
- [16] NF E 66-520 Working zones of cutting tools - Couple tool-material. 1997.

Klíčová slova

soustružení, optimalizační metody, vysoký tlak chladicí kapaliny, superslitiny na bázi niklu, opotřebení nástroje

ABSTRACT

This paper provides an overview of nickel based superalloys, their turning with high pressure jet assistance, it also concerns optimization methods for such a turning and tool wear analysis. This work was requested by the company Safran, with the experimental part performed at the production plant of Evry-Corbeil, France. The experimental study concerns the optimization of cutting conditions for internal rough turning of aircraft parts with high pressure jet assistance. The objectives of the study were following: comparison of different cutting inserts selected by the company, proposal of several roughing strategies, and determination of the optimal conditions for each strategy. Two different strategies are considered for the experiment: cutting with constant feed and depth of cut, and ramping strategy. For each strategy, the operation was performed in face and longitudinal turning. The results were compared according to the economic and productive criteria.

Key words

turning, optimization methods, high pressure jet assistance, nickel-based superalloys, tool wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARON, Yoann. *Určení řezných podmínek pro výrobu vybraných leteckých součástí*. Brno 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 93 s. 3 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc., Ing. David Prat, Ph.D.

